第 64 卷 第 3 期　　天　文　学　报　　Vol. 64 No. 3
2023 年 5 月　　ACTA ASTRONOMICA SINICA　　May, 2023

doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2023.03.008

近日太阳风高频静电波的观测研究进展*

史　晨[1,2†]

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)
(2 中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)

摘要　太阳风的演化过程是空间物理研究中的重要课题, 高频静电波因与太阳风粒子的分布息息相关而受到广泛关注. 最新的帕克太阳探测器(Parker Solar Probe, PSP)在近日太阳风(日心距离$r < 0.3$ AU)中观测到多种高频静电波动, 为研究近日太阳风中波粒相互作用提供了新机遇. 介绍了近日太阳风中高频静电波的观测现状, 总结了各类波动的观测特征, 包括已知波动模式的宽带离子声波、电子伯恩斯坦波和多种未知模式的静电波, 梳理了各个波动可能的激发方式或自由能来源, 并对未来可能的工作方向进行了展望.

关键词　太阳风, 等离子体, 波

中图分类号: P182;　**文献标识码**: A

1　引言

高频静电波可以影响太阳风中带电粒子(如电子和离子)的动力学行为[1], 研究高频静电波对理解太阳风中的波粒相互作用具有重要意义. 本文高频静电波指频率位于低混杂频率($f_{\rm lh}$)和电子等离子体频率之间的等离子体静电波. 太阳风中高频静电波的研究可以以2018年发射的帕克太阳探测器[2] (Parker Solar Probe, PSP)作为分界点. 在帕克太阳探测器发射前, 受限于卫星轨道, 只能实地研究日心距离$r \geqslant 0.3$ AU外太阳风中的高频静电波; 帕克太阳探测器可以进入近日太阳风($r < 0.3$ AU), 最近可至0.046 AU, 并携带有电磁场和粒子探测仪[3–4], 使实地观测研究近日太阳风中的高频静电波成为可能.

$r \geqslant 0.3$ AU外太阳风中主要观测到两种高频静电波: 离子声波和电子伯恩斯坦波. 离子声波是太阳风中常见的静电波, 观测历史悠久, 1976年已有基于太阳神卫星(Helios)观测研究[5], 后续多颗卫星也在太阳风中观测到离子声波[6–10]. 太阳风中的离子声波一般有如下特征: (1)线偏振静电波, 电场扰动平行于背景磁场[11–12]; (2)宽带波动, 频率范围可从100 Hz至10 kHz[5, 10]. 造成该现象的原因是离子声波波长较短(一般为$10 \leqslant \frac{\lambda}{\lambda_{\rm D}} \leqslant 50$, $\lambda_{\rm D}$表示德拜长度[7]), 易受太阳风多普勒效应影响; (3)随着日心距离r的增加, 离子声波的发生率和强度会减小, 峰值频率向低频漂移[6, 13]; (4)离子声波的强度和发生率与纬度相关, 低纬区(主要是慢太阳风)离子声波的强度和发生率都较高纬区(快太阳风)高[8]; (5)离子声波的强度和发生率与多种等离子体参数相关, 如离子束流、质子温度、电子质子温度比($T_{\rm e}/T_{\rm p}$)和电子热流等[6–8, 14]. 离子声波的激发也与上述等离子体参数有关, 例如静电电子热流不稳定性[15–16]、离子-离子声不稳定性[17–18]、电子-离子流不稳定性[19]、电子-电子-离子流不稳定性[18, 20–21]等, 此外, 温度梯度也可以激发离子声

2022-09-23收到原稿, 2023-02-20收到修改稿

*国家自然科学基金项目(41974203)资助

†shichen@pmo.ac.cn

波[22].

不同于离子声波, 电子伯恩斯坦波在$r \geqslant$ 0.3 AU外太阳风中观测较少, 仅被磁层粒子主动示踪探测器(Active Magnetospheric Particle Trace Explorers, AMPTE)和Wind卫星观测到[23–25]. 磁层粒子主动示踪探测器在锂离子释放过程中观测到电子伯恩斯坦波, 该波动准垂直于背景磁场传播且具有5 个频带, 最低频带位于1.8倍电子回旋频率($f_{\rm ce}$), 各频带之间频率差为1.1–1.2$f_{\rm ce}$[23–24]. 该波动并非起源于太阳风, Baumgärtel等[24]认为波动与锂原子光致电离后产生的锂离子和电子沿着不同轨道运动从而导致的电荷非中性有关. Wind卫星探测的电子伯恩斯坦波位于行星际激波附近, 该波动具有多个频带, 各频带位于整数或半整数倍$f_{\rm ce}$, 波动平行于激波法向但斜偏振于背景磁场传播[25]. 基于波形和粒子加热等观测现象, Wilson等人认为该波动可能由电子回旋漂移不稳定性激发[25].

帕克太阳探测器在近日太阳风中发现更多种类的高频静电波, 除了以往$r \geqslant 0.3$ AU卫星观测到的离子声波和电子伯恩斯坦波外[26–29], 还观测到多种新类型的静电高频波动如$f \sim 0.7f_{\rm ce}$波、$f < f_{\rm ce}$多带静电波、窄带离子声波、Type-B波、Type-C波和$f \sim f_{\rm lh}$宽带静电波等[27–32]. 此外, 波动发生率也明显增大, 如电子伯恩斯坦波发生率随日心距离减小而增大[27].

近日太阳风中高频静电波的研究方兴未艾, 本文主要介绍近年来帕克太阳探测器对近日太阳风高频静电波的观测结果, 结构如下: 第1节是研究背景; 第2节介绍宽带离子声波; 第3节介绍电子伯恩斯坦波; 第4节介绍新类型的高频静电波; 最后一章即第5章是对全文的总结.

2　宽带离子声波

由于帕克太阳探测器在近日太阳风中观测到新模式窄带离子声波, 本文将过去$r \geqslant 0.3$ AU观测到的离子声波称为宽带离子声波以示区别.

近日太阳风中的宽带离子声波由Mozer等[26]首次进行报道, 波动电场谱如图1左侧(a)图所示、电场具体波形见图1右侧(b)图. 宽带离子声波常见于近日太阳风中, 波动特性与$r \geqslant 0.3$ AU外观测到的离子声波类似, 具有如下特征: (1)线偏振静电波动, 电场扰动平行于背景磁场, 强度可达~15 mV/m; (2)宽带波动, 频率范围从几百Hz至几十kHz. (3)反平行于背景磁场传播. 此外, Mozer等人在switchback边界区和switchback中发现了非线性宽带离子声波, 并展示了该波动发展为离子洞的过程, 类似的事件极少被卫星观测到[33].

Mozer等人讨论了静电电子热流不稳定性(或电流激发)和离子-离子声不稳定性这两种常见的宽带离子声波激发方式的激发可能性[26]. 前者激发阈值与电子离子温度比($T_{\rm e}/T_{\rm i}$)相关, 在太阳风典型环境中有$T_{\rm e}/T_{\rm i} \sim 1$, 此时需要电子和离子的相对速度达到电子热速度才能激发, 而该条件在太阳风中很难达到; 后者则与离子不同成分的相对漂移有关. Mozer等人分析了当地等离子体参数, 发现电子温度和离子温度几乎相同($T_{\rm e}/T_{\rm i} \sim 1$), 即离子声波难以由静电电子热流不稳定性激发(或电流激发); 另一方面, 离子分布存在明显的束流特征, 并且离子声波的出现与离子束流的大小具有相关性, 因此Mozer等人认为该宽带离子声波是由离子-离子声不稳定性激发[26].

3　电子伯恩斯坦波

近日太阳风中存在3种频率分布不同的电子伯恩斯坦波, 最强频带分别位于$f_{\rm ce}$附近、整数倍$f_{\rm ce}$之间和多倍$f_{\rm ce}$附近, 本文将其称为$f \sim f_{\rm ce}$电子伯恩斯坦波(I型电子伯恩斯坦波)、II型电子伯恩斯坦波和III型电子伯恩斯坦波.

$f \sim f_{\rm ce}$电子伯恩斯坦波由Malaspina等[27]首次发现认证, 观测事例如图2所示. $f \sim f_{\rm ce}$电子伯恩斯坦波最强频带位于1.0倍$f_{\rm ce}$附近, 图2中红框所示, 波动在更高频率处具有谐频, 该频率分布与行星磁层(如地球磁层)环境中的电子伯恩斯坦波频率分布(位于整数倍$f_{\rm ce}$之间)有一定区别. 基于Malaspina等[27]和其他研究者[29, 34]对$f \sim f_{\rm ce}$电子伯恩斯坦波进行的统计和事例研究, 该类波动的观测性质可总结如下: (1)在近日太阳风中广泛存在, 发生率和强度随着日心距离r的减小而增大; (2)倾向位于平静的径向场中, 当波动出现时, 磁场方向与太阳径向方向的夹角多数情况下小于25°, 主要位于10°–15°; (3)部分波动最强频带与谐频具有很

好的频率倍数关系, 谐波可能由基频自身的非线性波-波耦合激发; (4)常见于核电子有很强的日向漂移速度(太阳风参考系)时, 如图3所示, 波动数量在核漂移速度为正时显著增加. 由于等离子体保持电流中性, 核电子的日向漂移与更热成分电子(如晕电子和strahl电子)的径向漂移正相关, 这说明$f \sim f_{ce}$电子伯恩斯坦波动可能由电子束流激发.

II型电子伯恩斯坦波也由Malaspina等[28]首次报道. 图4展示了一个典型的II型电子伯恩斯坦波的电场功率谱, 可见该波动各频带均大于f_{ce}且位于整数倍f_{ce}之间, 类似于行星磁层(如地球磁层)观测到的电子伯恩斯坦波. Malaspina等[28]报道的II型电子伯恩斯坦波最强频带是最低频带, 波动位于平静的径向场中. Shi等[29]则发现了观测特性和所处环境不同的II型电子伯恩斯坦波. 在Shi等人的事件中, 波动最强频带位于谐频, 事件则发生于磁场扰动较强日球层电流片附近[29]. Shi等[29]发现波动的观测特性与电子伯恩斯坦波激发的模拟结果和不稳定性理论预测相符, 得到波动是当地激发的结论. 他们接着计算了共振能量, 结果表明该波动可以与30–3000 eV电子共振, 在电子分布中, 40–150 eV电子具有正反于背景磁场的双向电子流和垂直温度大于平行温度的温度各向异性, 因此他们认为该波动的激发与电子束流或温度各向异性相关[29].

III型电子伯恩斯坦波由Shi等[29]首次发现报道, 该波动出现在磁场扰动较为剧烈的日球层电流片附近. 图5展示了该类波动的电场功率谱密度(左图)、平均功率谱密度(中图)和各谐波的参数如功率谱峰值频率、频带宽度和频带振幅(右图), 可见该类型电子伯恩斯坦波最低频带较前两种高, 位于$3.93f_{ce}$, 其余频带出现在整数倍f_{ce}附近. III型电子伯恩斯坦波最有意思的一点是受到低频离子尺度波动的调制, Shi等[29]发现电子伯恩斯坦波的电场谱强度具有周期性, 他们对波动的电场扰动和低频离子尺度波的磁场扰动进行相干性分析, 发现两者之间具有很好的相关关系(相关系数大于0.75), 如图5下图, 这是电子伯恩斯坦波受到调制的直接观测证据. 对于该波动的激发, Shi等[29]认为低频波的调制周期($\sim 1/f_{cp}$, f_{cp}为质子回旋频率)远大于线性不稳定性的时间尺度($\sim 1/f_{ce}$), 该波动更可能是非局地激发, 但也无法排除离子尺度波调制电子分布使其具有自由能从而激发电子伯恩斯坦波的可能性.

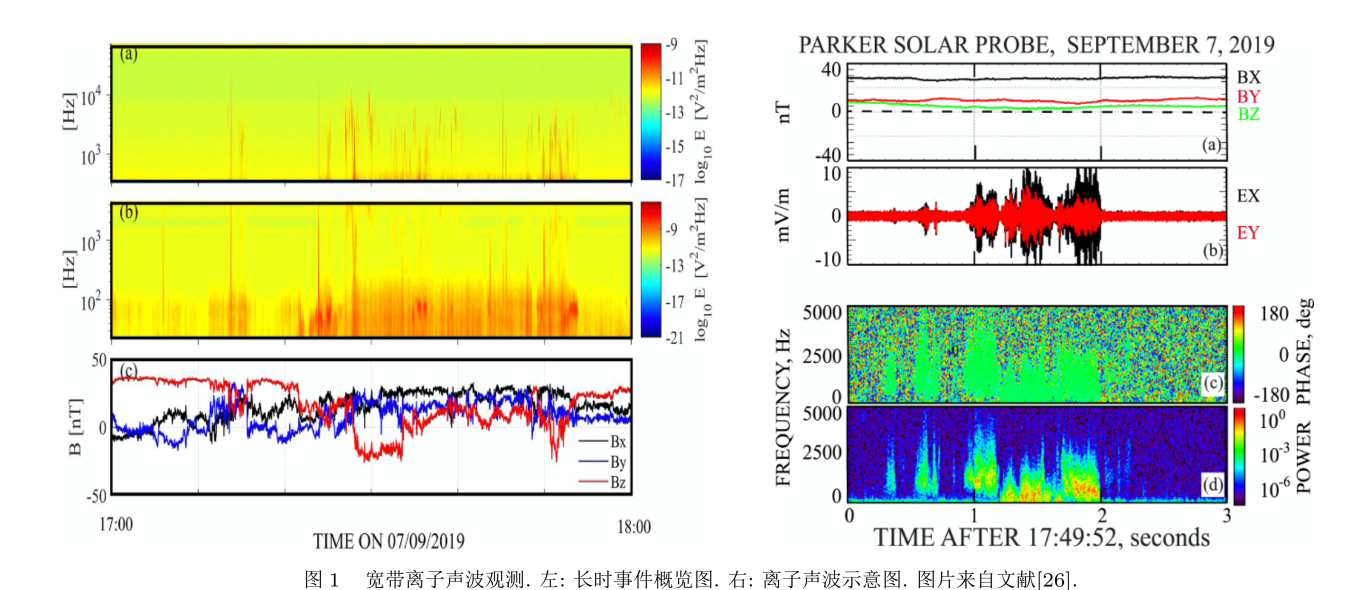


图 1 宽带离子声波观测. 左: 长时事件概览图. 右: 离子声波示意图. 图片来自文献[26].

Fig. 1 Observation of boardband ion-acoustic wave. Left: long duration event overview. Right: an example of ion-acoustic wave. This figure is from Ref. [26].

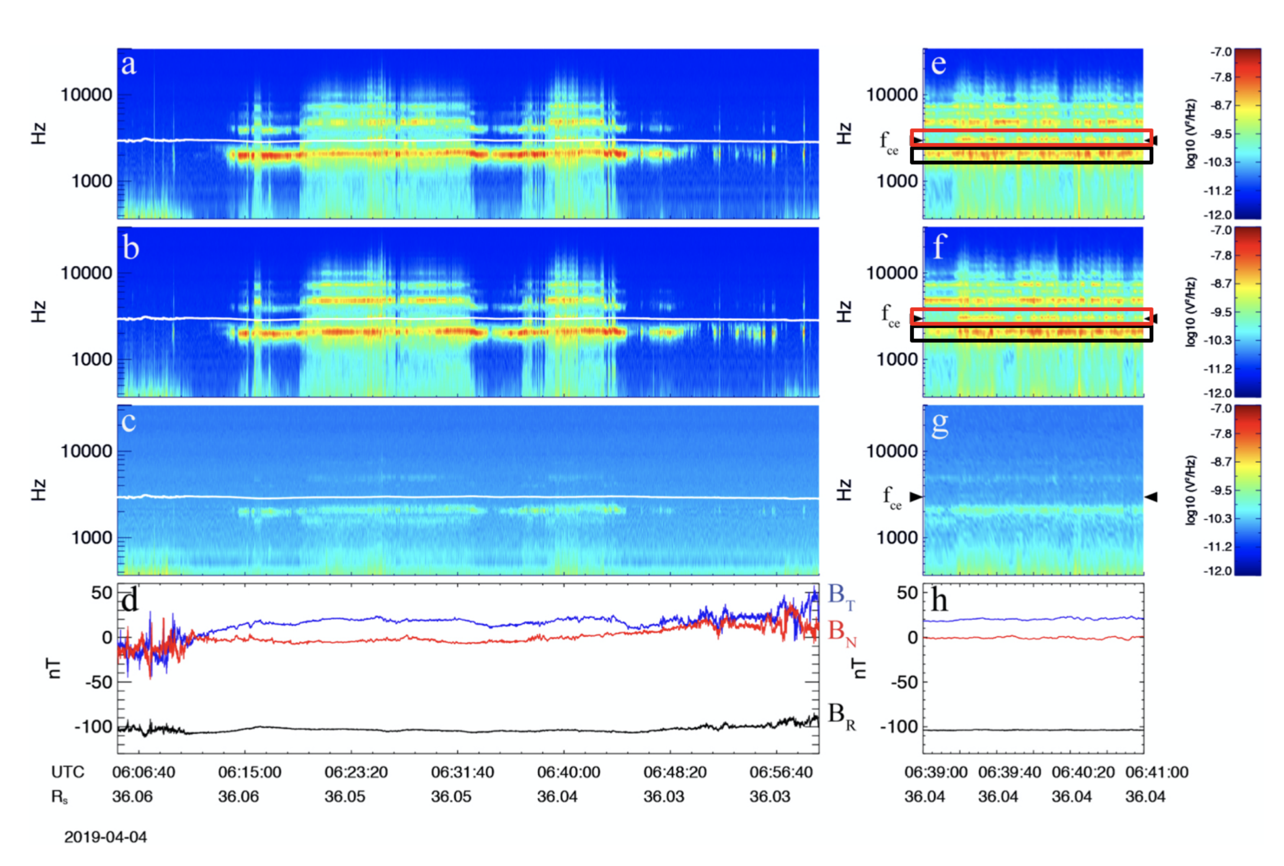


图 2 $f \sim f_{ce}$电子伯恩斯坦波和$f \sim 0.7f_{ce}$波观测事例. 左图: 事件概览图. 右图: 波动示意图, 图中红框中是$f \sim f_{ce}$电子伯恩斯坦波, 黑框中是$f \sim 0.7f_{ce}$波. 图片来自文献[27].

Fig. 2 Observation of $f \sim f_{ce}$ electron Bernstein waves and $f \sim 0.7f_{ce}$ waves. Left: event overview. Right: example of waves, where $f \sim f_{ce}$ electron Bernstein waves in the red square and $f \sim 0.7f_{ce}$ waves in the black square. This figure is from Ref. [27].

4 新类型高频静电波

帕克太阳探测器在近日太阳风中观测到了多种模式未知的新类型高频静电波, 这些波动多数表现为窄带波形式.

4.1 $f \sim 0.7f_{ce}$波

$f \sim 0.7f_{ce}$波由Malaspina等[27]首次发现, 如图2所示, 波动特征频率如其名, 即位于$0.7f_{ce}$及其谐频附近, 图2中黑框所示. $f \sim 0.7f_{ce}$波常与$f \sim f_{ce}$电子伯恩斯坦波同时观测到, 两者具有类似的特征, 即波动主要位于平静的径向磁场中、发生率和强度随着日心距离r的减小而增大、最可能由电子束流激发等. 在观测中, 部分$f \sim 0.7f_{ce}$波的基频频率和谐频频率具有很好的倍数关系, 这说明谐频可能由$0.7f_{ce}$频带自身非线性波-波耦合产生[34]. 此外, $f \sim 0.7f_{ce}$波也可以与$f \sim f_{ce}$电子伯恩斯坦波发生非线性波-波耦合而激发出谐波[34].

4.2 $f < f_{ce}$多带静电波

$f < f_{ce}$多带静电波由Shi等[29]发现和报道, 如图6所示, 波动事件发生于日球层电流片附近. Shi等人基于图6数据给出该波动的观测特点[29]: (1)多带、窄带静电波; (2)最强频带的频率远低于f_{ce}, 谐频则可以达到或超过f_{ce}; (3)各谐频之间具有很好的频率相关性和强度相关性, 意味着该波动的谐频是由非线性波-波相互作用激发. 随后Shi等[29]讨论了该波动的波动模式和基频激发方式, 理论上频率处于该频段的波动有离子声波、离子伯恩斯坦波和低混杂波, 但离子伯恩斯坦波频率差与观测不

符、平行离子声波(即宽带离子声波)无法解释垂直于磁场的电场扰动, 因此波动模式可能为斜离子声波或低混杂波. 虽然该波动具体模式未知, 但斜离子声波和低混杂波的激发都与粒子流相关, 理论研究表明, 离子声波可以被离子-离子声不稳定性激发, 低混杂波可以被电子热流不稳定性激发, 这两种自由能均可存在于日球层电流片附近[29].

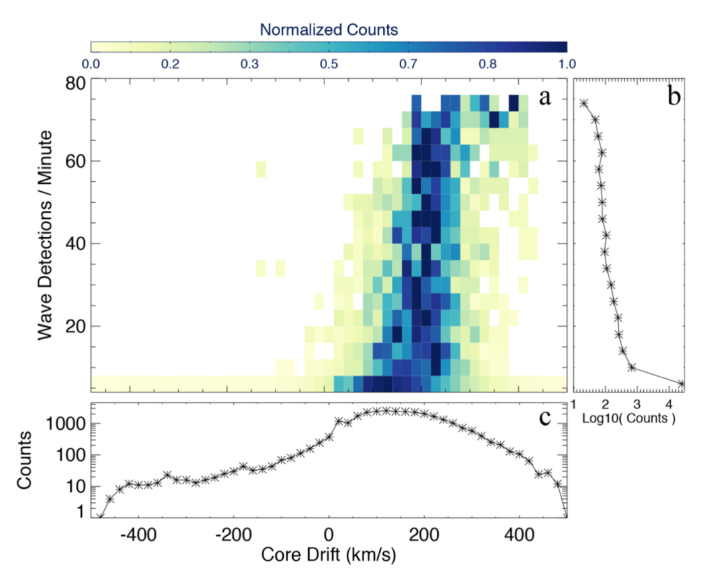


图 3 当$f \sim f_{ce}$电子伯恩斯坦波和$f \sim 0.7f_{ce}$波出现时核电子的漂移速度. 图片来自文献[27].

Fig. 3 The drift velocity of the core electrons when observed $f \sim f_{ce}$ electron Bernstein waves and $f \sim 0.7f_{ce}$ waves. This figure is from Ref. [27].

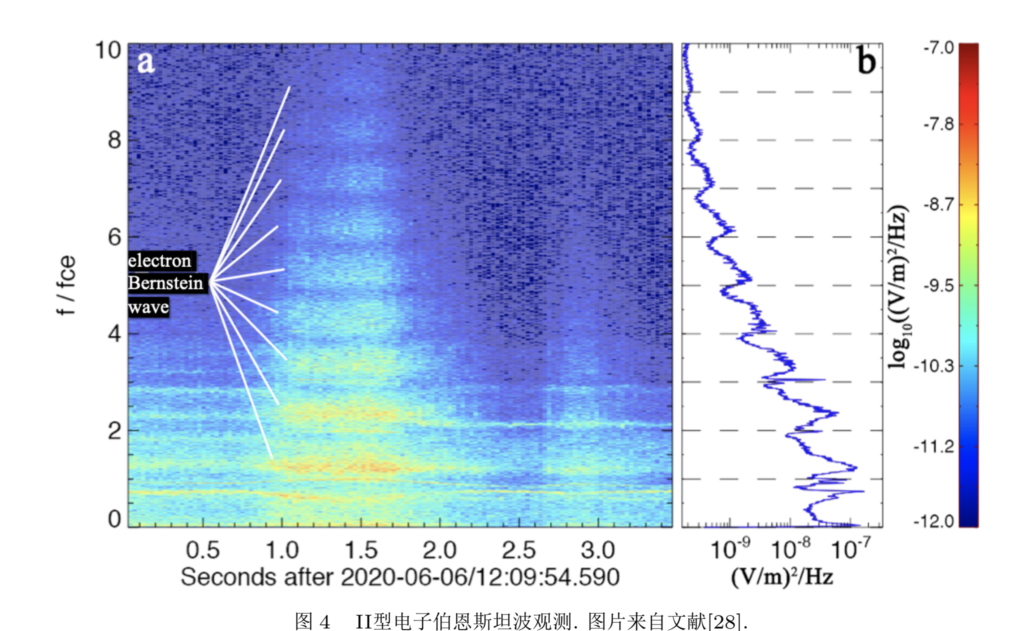
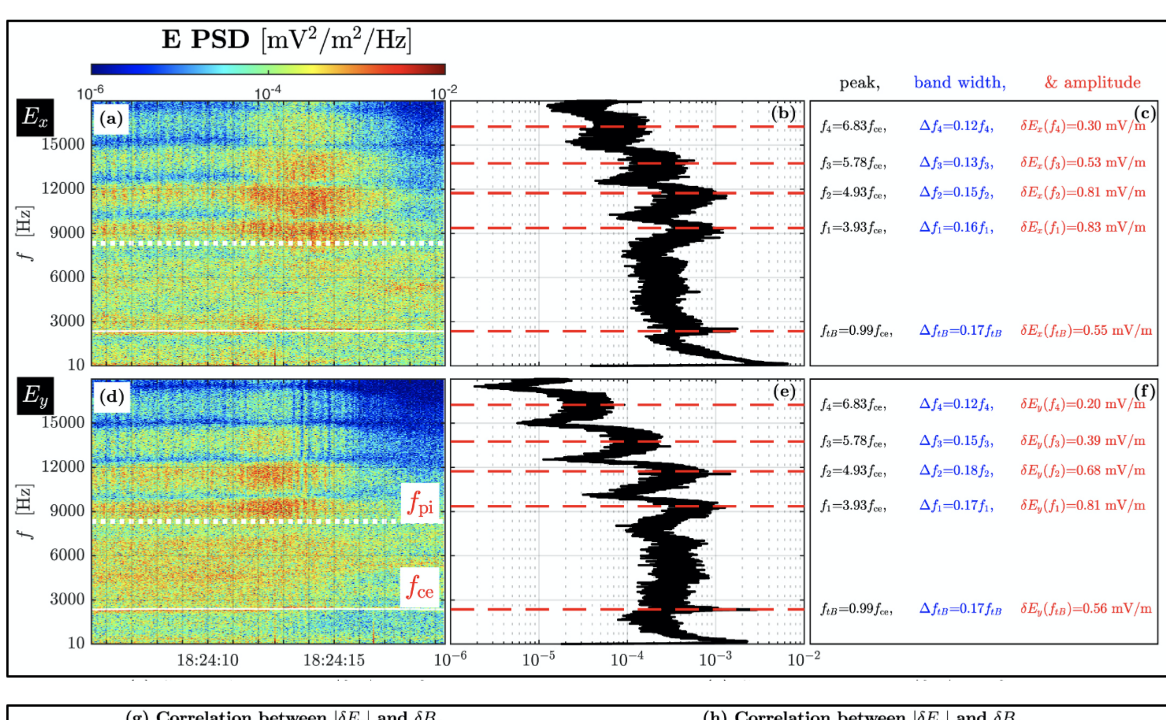


图 4 II型电子伯恩斯坦波观测. 图片来自文献[28].

Fig. 4 Observation of Type-II electron Bernstein waves. This figure is from Ref. [28].



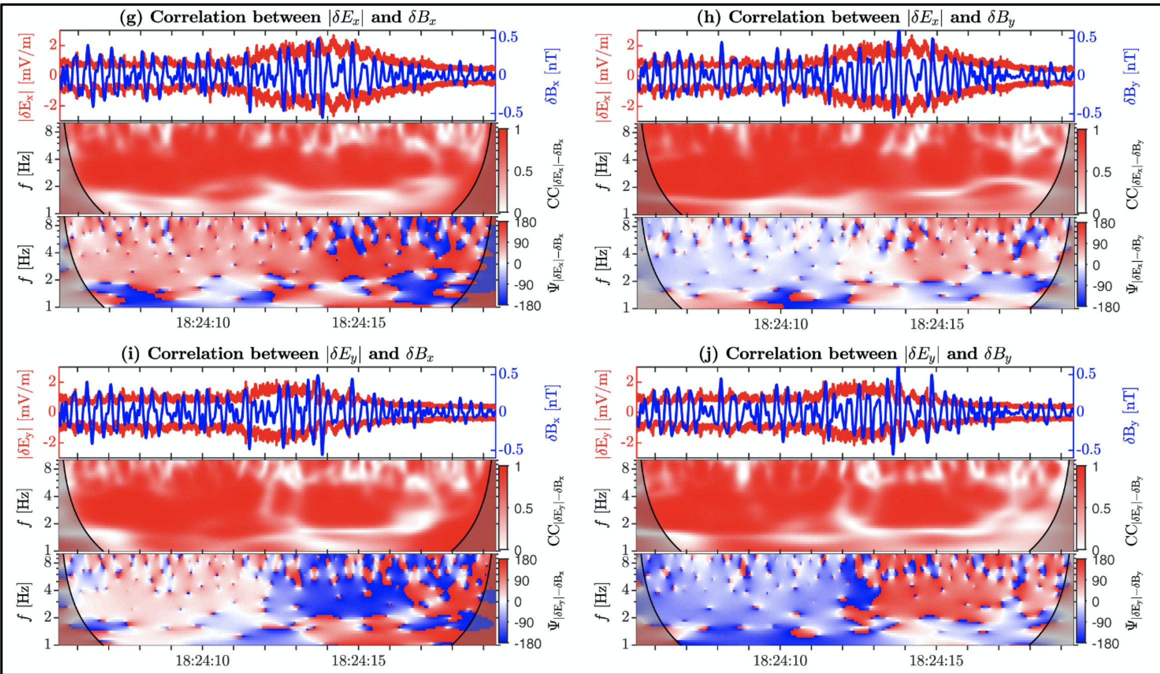


图 5 III型电子伯恩斯坦波观测. 上图: 波动特征, 从左到右分别为各频带的电场功率谱密度(PSD)、平均功率谱密度和波动参数包括峰值、频带宽度和频带振幅. 下图: 电子伯恩斯坦波强度与低频离子尺度波磁场扰动相干谱. 图片来自文献[29].

Fig. 5 Observation of Type-III electron Bernstein waves. Top: wave features, the panels from left to right are the electric field PSDs spectrogram, the averaged PSDs, and wave parameters including peak, bandwidth and amplitude in each frequency band. Bottom: coherence spectra between the strength of the electron Bernstein waves and the magnetic field perturbations of low-frequency ion-scale waves. This figure is from Ref. [29].

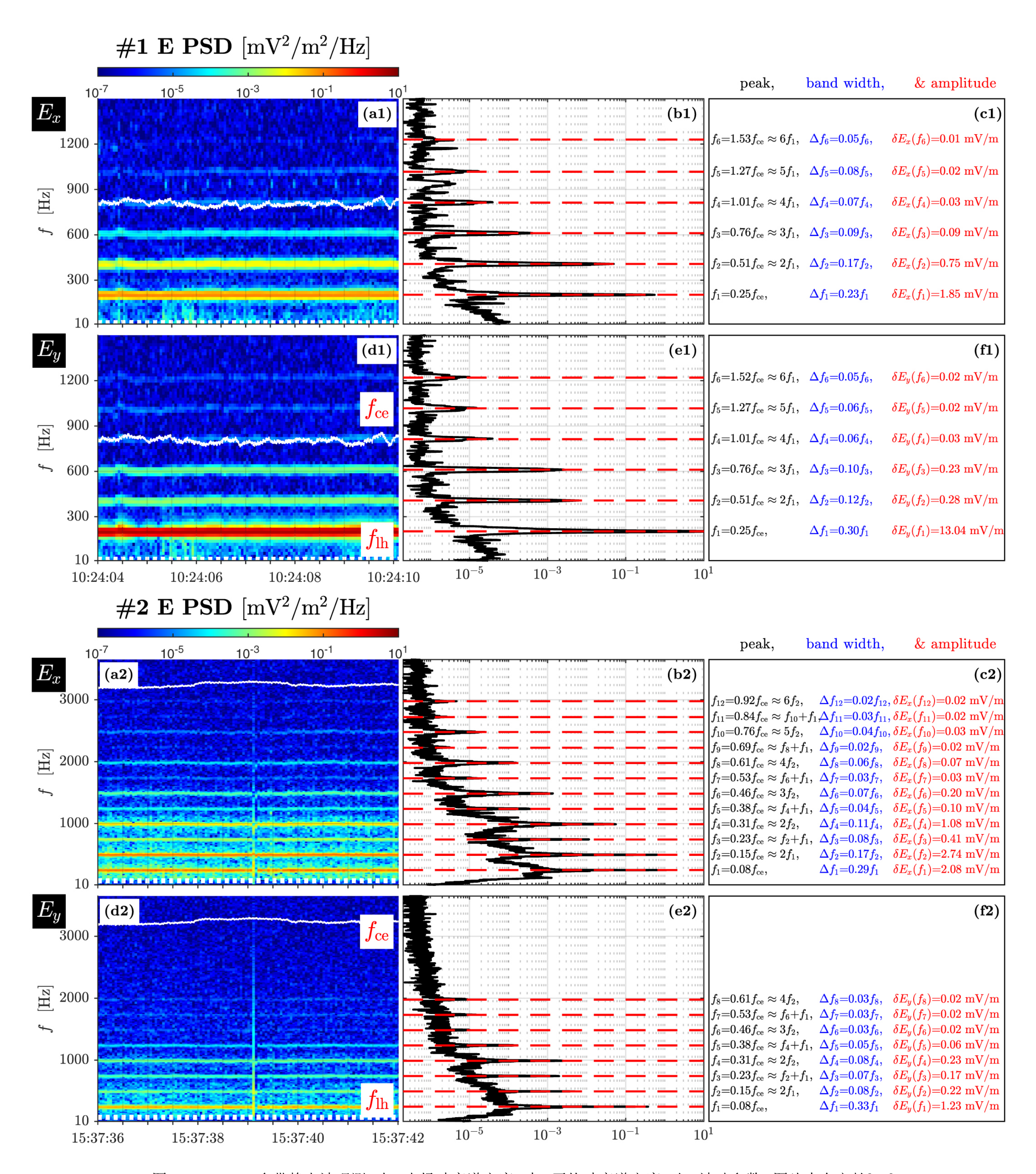


图 6　$f < f_{ce}$ 多带静电波观测. 左: 电场功率谱密度. 中: 平均功率谱密度. 右: 波动参数. 图片来自文献[29].

Fig. 6　Observation of $f < f_{ce}$ multiband electrostatic waves. Left: electric field PSDs. Middle: the averaged PSDs. Right: wave parameters. This figure is from Ref. [29].

4.3 窄带离子声波

窄带离子声波也被称为触发式离子声波(triggered ion-acoustic wave), 是近日太阳风中发现的新类型波动, 由Mozer等人首次报道, 波动特征如图7[30]. 图7左图展示了一个长时间(∼12 h)窄带离子声波事件, 图中可以看到明显的窄带静电波动, 频率为百Hz量级, 远低于当地离子等离子体频率$f_{\rm pi} \sim 9$ kHz. 图7右图给出了窄带离子声波的电场波形图, 窄带离子声波电场表现为类似冲击波的波包, 周期为1.5 s, 与当地磁场低频扰动周期相同. Mozer等[30]认为该波动的本质是斜传播的离子声波, 理由如下: (1)当地离子存在明显的离子束流, 并且有$T_{\rm e}/T_{\rm i} \sim 5$, 等离子体环境有利于离子声波激发; (2)波动相速度约为100 km/s, 接近于当地离子声速∼120 km/s; (3)卫星X-Y平面上的磁场和电场存在一定夹角, 该波动非平行于背景磁场传播. 对于该波动的激发方式, Mozer等[30]研究了仪器坐标系下不同速度平面的离子分布函数, 如图8所示. 图8表明当地离子束流相当大, 在分布函数的尾部产生一个隆起. 对该离子分布的拟合结果说明当地离子参数处于理论给出的离子-离子声不稳定性的边缘, 因此Mozer等[30]认为该波动由离子-离子声不稳定性激发.

后续, Mozer等[31]对窄带离子声波进行了统计研究, 该波动一般具有如下特征: (1)常见于15–30个太阳半径; (2)频率范围约为100–1000 Hz; (3)背景电场出现几Hz的低频电场结构, 窄带离子声波锁定在电场结构的某个相位上周期性出现; (4)周期性的波动和电场结构可以持续很长时间, 甚至能接近1 d; (5)等离子体数密度存在与窄带离子声波和电场结构相同频率的扰动; (6)磁场中则未观测到符合窄带离子声波和电场结构频率的波动信号; (7)窄带离子声波的电场和密度扰动是纯正弦波, 波动的带宽非常窄. 此外, Mozer等[31]还发现窄带离子声波与核电子加热相关, 当窄带离子声波出现时, 核电子会被加热至理论模型中最低温度的2倍以上.

一般来说, 离子束流提供的不稳定性在线性阶段可以激发准单色的离子声波, 离子声波在激发后会俘获离子和电子从而进入非线性发展阶段, 最终演变为以往观测到的宽带波动[26, 30, 33]. Mozer等人认为该波动的窄带形式是因为低频磁场波动为局地激发准单色离子声波提供了稳定的等离子体参数[30], 然而他们后续的统计研究却发现窄带离子声波和磁场扰动并不具有相关性[31]. 因此, 窄带离子声波模式存疑, 虽然Mozer等[30] 认为该波动的模式是斜离子声波, 但本文将其划分为未知模式的窄带静电波.

4.4 Type-B波和Type-C波

Malaspina等[28]发现$f_{\rm ce}$附近同时出现3种波动, 波动的电场功率谱密度、极化程度和椭圆度如图9所示. 图9中频率高于$f_{\rm ce}$的波动为电子伯恩斯坦波(即本文第3节的II型电子伯恩斯坦波), Malaspina等人将其称为Type-A波[28]; 此外, 图9中还有两种频率低于$f_{\rm ce}$的新波动, Malaspina等人将其分别称为Type-B波和Type-C波[28]. Type-B波和Type-C波都是窄带波动, 具有如下特性[28]: (1)两者易受多普勒效应影响, 卫星坐标下频率多变且表现为镜像对称特点; (2)在等离子体坐标下, Type-B波的频率接近于$1.0f_{\rm ce}$, Type-C波频率则约为$0.5f_{\rm ce}$; (3)对比卫星坐标系和等离子体坐标系下的频率, Type-B波矢具有指向太阳的成分, 而Type-C波矢则存在反向于太阳的成分; (4) Type-B是右旋偏振波, Type-C是左旋偏振波; (5)两者都是倾斜于背景磁场传播, Type-B波与背景磁场存在约为70°的夹角, Type-C波与背景磁场存在约为85°的夹角; (6)两者一般位于平静的径向磁场中. 需要注意的是, Type-B波和Type-C波并非总是同时出现, 例如Shi等人后续报道了只存在Type-B波的事件[29], 但两者同时出现时均观测到频率镜像对称的特征[28]. 在Shi等人报道的事件中, Type-B波出现存在谐波的新特征[29]. 此外, Malaspina等[28]指出, 受限于卫星谱图的低时间分辨率(∼0.87 s), Type-B和Type-C在卫星功率谱中分别与$f \sim f_{\rm ce}$电子伯恩斯坦波和$f \sim 0.7f_{\rm ce}$波出现在相同的频带, 两者之间难以区分.

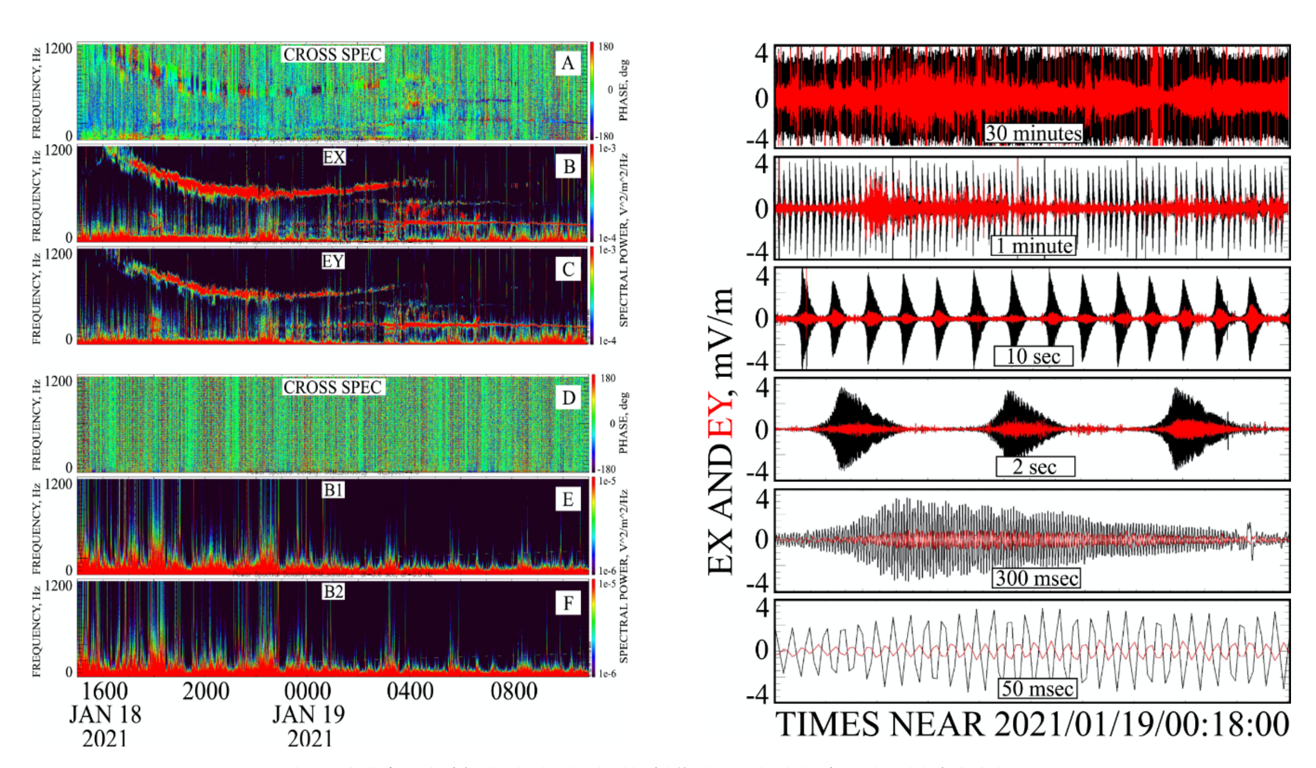


图 7 窄带离子声波概览图. 左图: 电磁场频谱图. 右图: 电场波形图. 图片来自文献[30].

Fig. 7 Observation of narrowband ion-acoustic waves. Left: spectrogram of the electric field and magnetic field. Right: electric field waveforms. This figure is from Ref. [30].

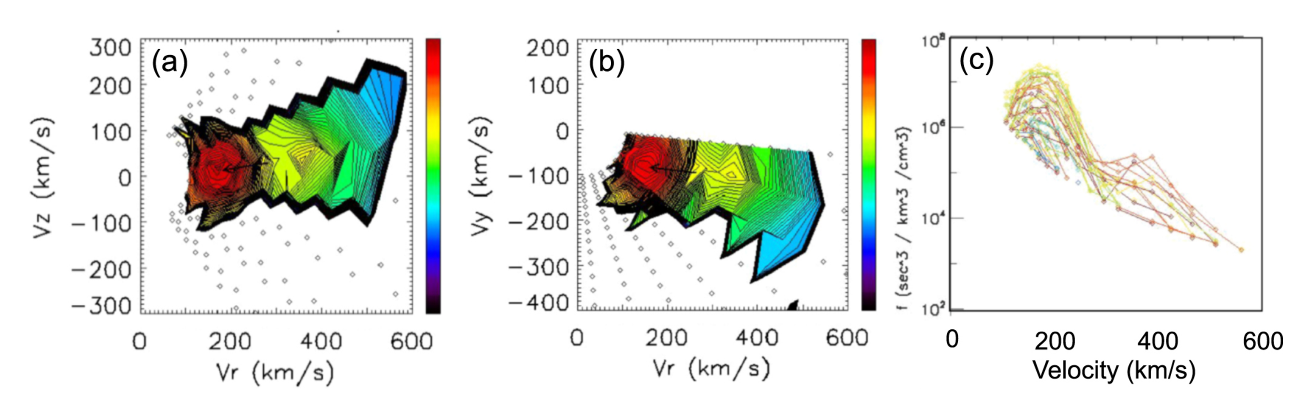


图 8 窄带离子声波事件期间一个典型离子尾隆速度分布. 图片来自文献[30].

Fig. 8 A typical ion bump-in-tail distribution during narrowband ion-acoustic wave event. This figure is from Ref. [30].

目前, 理论上无法给出Type-B波和Type-C波可能的波动模式. Malaspina等[28]分析了两种波动可能的自由能来源和激发方式, 他们计算了Type-B波和Type-C波的共振能量, 发现两者都与低能(~ 0.00007–23.0 eV)核电子成分发生共振, 可能与电子反常回旋共振有关且于当地激发, 但受限于仪器无法探测到可靠的低能量段电子分布, 难以进行不稳定性研究. Malaspina等[28]后续构建了波动的激发模型, 并对多种可能的激发方式进行了讨论, 例如电子回旋漂移不稳定性、非线性波-波相互作

用、电磁波动衰退、损失锥不稳定性等, 但均无法激发与观测对应的波动或观测参数不满足不稳定性的出现要求, Type-B波和Type-C波的激发方式仍然未知.

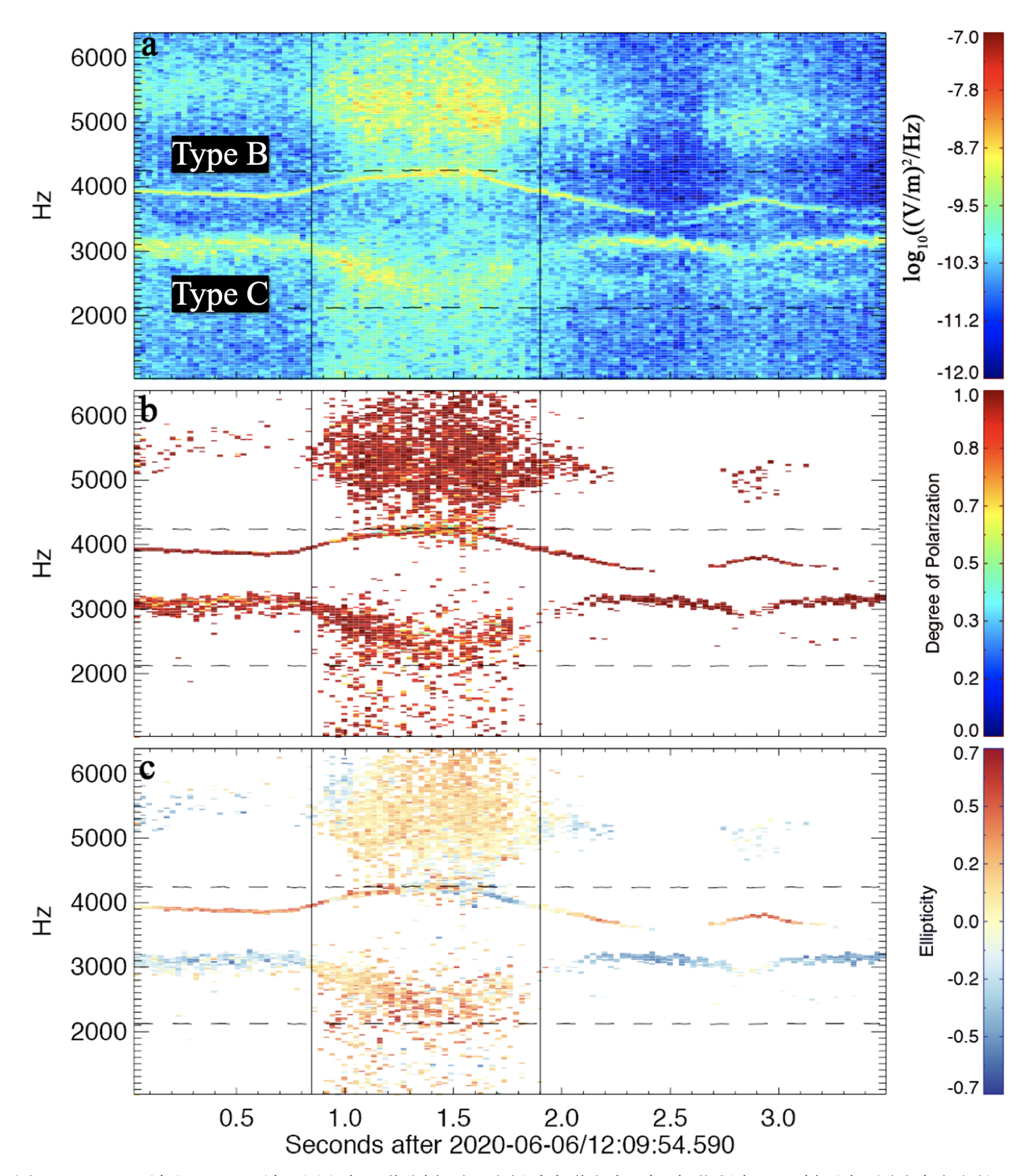


图 9 Type-B波和Type-C波观测和交叉谱分析. 上: 电场功率谱密度. 中: 极化程度. 下: 椭圆度. 图片来自文献[28].

Fig. 9 Observation and cross-spectral analysis of Type-B wave and Type-C wave. Top: electric field PSDs. Middle: degree of polarization. Bottom: ellipticity. This figure is from Ref. [28].

4.5 $f \sim f_{\rm lh}$宽带静电波

Zhao等[32]首次报道了频率位于低混杂频率$f_{\rm lh}$附近的宽带静电波, 图10展示了该波动在4个不同时段中的电场谱(图II和图III)和电场波形(图IV), 本文根据频率特征将该波动命名为$f \sim f_{\rm lh}$宽带静电波. Zhao等[32]分析了帕克太阳探测器第8轨探测到的长时间$f \sim f_{\rm lh}$宽带静电波事件, 发现$f \sim f_{\rm lh}$宽带静电波具有如下特征: (1)波动的能量主要位于

0.3–2$f_{\rm lh}$, 波动的频带宽度为1–6$f_{\rm lh}$; (2)波动振幅为~ 0.1–50 mV/m; (3)电场孤波结构会伴随着波动出现, 且结构的电场振幅可达~ 500 mV/m (见图10 (d–VI); (4)波动倾斜于背景磁场传播; (5)波动与$\beta_{\rm p}$ (质子热压与磁压之比)有一定相关性, 主要位于$\beta_{\rm p}$ ~ 0.03–3; (6)波动的出现与磁场是否为径向场无关, 也与磁场和太阳风的夹角无关. 需要注意的是, Malaspina等[35]也报道了频率位于$f_{\rm lh}$附近的波动, 但他们事件中的波动是具有磁场扰动的电磁波, 与该静电波有本质上的区别.

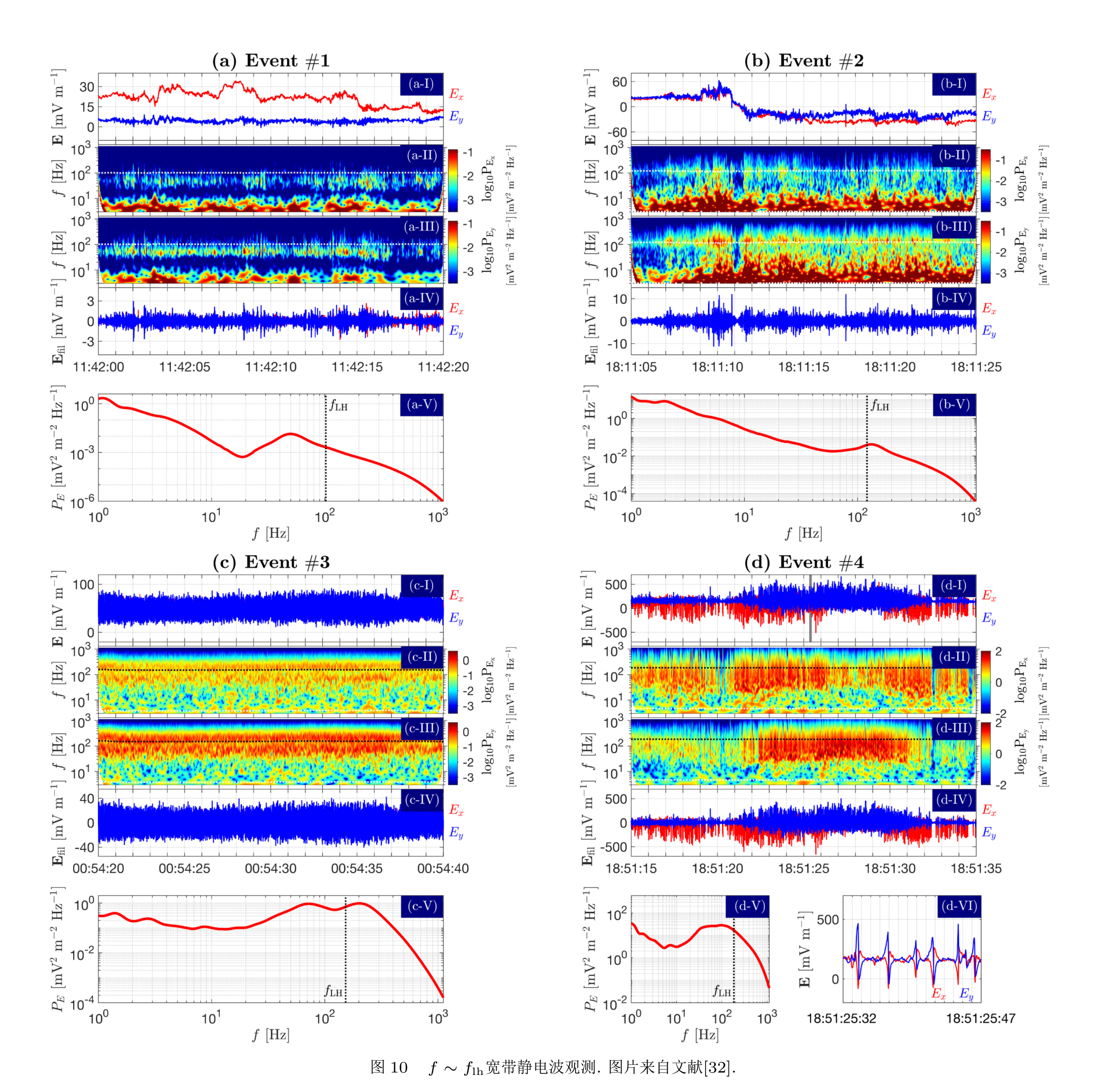


图 10 $f \sim f_{\rm lh}$宽带静电波观测. 图片来自文献[32].

Fig. 10 Observations of $f \sim f_{\rm lh}$ broadband electrostatic waves. This figure is from Ref. [32].

Zhao等[32]接着对$f \sim f_{\rm lh}$宽带静电波的波动模式进行了详细的讨论, 理论上频率低于$f_{\rm ce}$的斜传播静电波(或准静电波)有低混杂波、斜离子声波和离子伯恩斯坦波3种, 他们认为波动模式更可能是低混杂波: (1)近似符合近日太阳风环境的两成分(离子和电子)等离子体模型理论表明斜离子声波和离子伯恩斯坦波频率难以达到观测的频率, 而低混杂波频率与观测较为相符; (2)在不稳定性的理论研究中, 低混杂波相关的不稳定性可以激发出更符合观测的波动; (3)低混杂波可在地球磁鞘区被观测到, 且表现为$f_{\rm lh}$附近的宽带静电波, 与该事件波动特征类似. 不过由于帕克太阳探测器仪器限制以及理论模型和实际观测可能存在差别, Zhao等人并没有完全排除斜离子声波和离子伯恩斯坦波的可能性[32]. 最后, 由于$f \sim f_{\rm lh}$宽带静电波在近日太阳风中较为常见, Zhao等[32]认为该波动可以导致strahl电子的投掷角散射, 起着调节电子热流的作用.

5 结论

帕克太阳探测器使实地观测研究$r < 0.3$ AU近日太阳风中的高频静电波成为可能, 为高频静电波的研究揭开了崭新的一页.

本文介绍了帕克太阳探测器卫星在近日太阳风观测的高频静电波的研究成果. 两种$r \geqslant 0.3$ AU太阳风中存在的高频静电波(宽带离子声波和电子伯恩斯坦波)在近日太阳风中被发现并报道. 离子声波在不同太阳风区域表现类似, 而电子伯恩斯坦波在近日太阳风中发生率显著增高、特征频率更加丰富. 除了上述两种已知波动外, 还发现了多种模式未知的新波动, 如$f \sim 0.7f_{\rm ce}$波、$f < f_{\rm ce}$多带静电波、窄带离子声波、Type-B波、Type-C波和$f \sim f_{\rm lh}$宽带静电波等. 对于这些新波动的研究工作主要集中于波动识别和统计特征上, 其次是讨论波动本质和激发方式, 而对波动应用的研究较少, 仅发现窄带离子声波可以加热近日太阳风中的核电子.

从目前观测研究结果来看, 高频静电波研究前景广阔. 帕克太阳探测器观测到多种高频静电波新现象, 有待更深入的研究对其进行解释; 新波动的波动本质尚不明确, 理论研究也急需完善; 波动的激发方式往往局限于参数统计或经验分析, 可以定性或定量地进行不稳定性分析; 波动的应用, 如何与粒子进行相互作用也应受到关注. 此外, 最新研究发现帕克太阳探测器观测到的部分静电波可能是由航天器尾流效应导致的[36], 即波动不一定源于太阳风, 波动的来源也是需要重点考虑的新问题. 高频静电波具有调节电子热流、加热太阳风粒子等作用, 是理解太阳风中波粒相互作用的探针[37]. 相信随着帕克太阳探测器逐渐接近于太阳以及理论研究的完善, 我们可以观测到更加丰富的已知或未知模式的高频静电波动, 解决波动的本质和激发方式等问题, 了解波动对近日太阳风中粒子动力学的影响, 评估高频静电波在近日太阳风演化过程中的作用, 为解决太阳风加速等难题提供帮助.

致谢 感谢审稿人对文章提出的宝贵建议, 使文章质量有了显著的提高.

参 考 文 献

[1] Verscharen D, Chandran B D G, Boella E, et al. FrASS, 2022, 9: 951628
[2] Fox N J, Velli M C, Bale S D, et al. SSRv, 2016, 204: 7
[3] Bale S D, Goetz K, Harvey P R, et al. SSRv, 2016, 204: 49
[4] Kasper J C, Abiad R, Austin G, et al. SSRv, 2016, 204: 131
[5] Gurnett D A, Anderson R R. JGR, 1977, 82: 632
[6] Kurth W S, Gurnett D A, Scarf F L. JGR, 1979, 84: 3413
[7] Mangeney A, Salem C, Lacombe C, et al. AnGeo, 1999, 17: 307
[8] Lin N G, Kellogg P J, MacDowall R J, et al. SSRv, 2001, 97: 193
[9] Wilson III L B, Cattell C, Kellogg P J, et al. PhRvL, 2007, 99: 041101
[10] Píša D, Souček J, Santolík O, et al. A&A, 2021, 656: A14
[11] Briand C. NPGeo, 2009, 16: 319
[12] Wilson III L B, Brosius A L, Gopalswamy N, et al. RvGeo, 2021, 59: e2020RG000714
[13] Schwenn R, Marsch E. Physics of the Inner Heliosphere II. Berlin: Springer, 1991: 143-148
[14] Gurnett D A, Marsch E, Pilipp W, et al. JGR, 1979, 84: 2029
[15] Forslund D W. JGR, 1970, 75: 17
[16] Lemons D S, Asbridge J R, Bame S J, et al. JGR, 1979, 84: 2135
[17] Gary S P, Omidi N. JPlPh, 1987, 37: 45

[18] Graham D B, Khotyaintsev Y V, Vaivads A, et al. A&A, 2021, 656: A23
[19] Bernstein I B, Kulsrud R M. PhFl, 1960, 3: 937
[20] Lapuerta V, Ahedo E. PhPl, 2002, 9: 3236
[21] Norgren C, André M, Graham D B, et al. GRL, 2015, 42: 7264
[22] Allan W, Sanderson J J. PlPh, 1974, 16: 753
[23] Roeder J L, Koons H C, Holzworth R H, et al. JGR, 1987, 92: 5768
[24] Baumgärtel K, Sauer K. JGR, 1989, 94: 11983
[25] Wilson III L B, Cattell C A, Kellogg P J, et al. JGR, 2010, 115: A12104
[26] Mozer F S, Bonnell J W, Bowen T A, et al. ApJ, 2020, 901: 107
[27] Malaspina D M, Halekas J, Berčič L, et al. ApJS, 2020, 246: 21
[28] Malaspina D M, Wilson III L B, Ergun R E, et al. A&A, 2021, 650: A97
[29] Shi C, Zhao J S, Malaspina D M, et al. ApJL, 2022, 926: L3
[30] Mozer F S, Vasko I Y, Verniero J L. ApJL, 2021, 919: L2
[31] Mozer F S, Bale S D, Cattell C A, et al. ApJL, 2022, 927: L15
[32] Zhao J S, Malaspina D M, De Wit T D, et al. ApJL, 2022, 938: L21
[33] Mozer F S, Bonnell J W, Hanson E L M, et al. ApJ, 2021, 911: 89
[34] Ma J Q, Gao X L, Yang Z W, et al. ApJ, 2021, 918: 26
[35] Malaspina D M, Chasapis A, Tatum P, et al. ApJ, 2022, 936: 128
[36] Malaspina D M, Tigik S F, Vaivads A. ApJL, 2022, 936: L20
[37] Kellogg P J. ApJ, 2020, 891: 51

Progress in the Observation Research of High-frequency Electrostatic Waves in the Near-Sun Solar Wind

SHI Chen[1,2]
(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)
(2 School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract The evolution process of the solar wind is an important topic in space physics. High-frequency electrostatic waves have attracted wide attention because they are closely related to the distributions of the solar wind particles. The recently launched Parker Solar Probe (PSP) has observed a variety of high-frequency electrostatic waves in the near-Sun solar wind (solar distance $r < 0.3$ AU), which provides a new opportunity to study the wave-particle interactions therein. In this review, we introduce the research status of high-frequency electrostatic waves, summarize the observational features of each wave, including the well-known ion-acoustic waves, electron Bernstein waves and some unknown electrostatic waves. We also discuss the possible excitation mechanisms or free energy sources of each wave. Besides, we present our perspectives on the topic.

Key words solar wind, plasmas, waves